

Systemdynamik der Eisenbahn

Popp, Karl

Veröffentlicht in:
Jahrbuch 2000 der Braunschweigischen
Wissenschaftlichen Gesellschaft, S.47-51



J. Cramer Verlag, Braunschweig

KARL POPP, Neustadt/Nds.

Systemdynamik der Eisenbahn

Hannover, 12.05.2000*

1. Einführung und Fragestellung

Die erste deutsche Eisenbahn für Personenverkehr wurde 1835 auf der Strecke Nürnberg-Fürth eröffnet. Die dampfbetriebene Lokomotive „Adler“ erreichte eine Durchschnittsgeschwindigkeit von 40 km/h. Ärzte befürchteten, die Fahrgäste könnten aufgrund der hohen Geschwindigkeit geisteskrank werden, [1]. Tatsächlich wurde die Geschwindigkeit reduziert, um den Verschleiß zu mindern. Inzwischen hat sich die Eisenbahntechnik wesentlich weiterentwickelt. Seit 1990 steht der Geschwindigkeits-Weltrekord für Schienenfahrzeuge bei 515 km/h, aufgestellt durch den Zug TGV-A 325 der französischen Staatsbahn SNCF. Bei früheren Rekordfahrten der SNCF traten infolge der starken dynamischen Wechselwirkungen zwischen Fahrzeug und Fahrweg erhebliche Schäden an Gleis und Oberleitung auf, die allerdings erst Jahre später veröffentlicht wurden, vgl. [2], [3]. Moderne Eisenbahnen in Europa und Japan erreichen heute Reisegeschwindigkeiten von 250-300 km/h im Regelbetrieb und zählen zu den sichersten Verkehrsmitteln. Die hohe Systemsicherheit der Eisenbahn läßt sich belegen trotz einzelner schwerer Unfälle in den letzten Jahren, wie z. B. dem verheerenden Unglück in Eschede 1998, das 101 Todesopfer forderte.

Auch wenn die Eisenbahn ein vergleichsweise altes technisches System ist, das durch die Optimierung seiner Komponenten, vgl. Abb. 1, die heutigen Geschwindigkeitsanforderungen erfüllt und zudem einen hohen Sicherheitsstandard aufweist, besteht dennoch aktueller Forschungsbedarf. Er ist begründet durch unvorhergesehene Langzeitschäden, die im Hochgeschwindigkeitsverkehr aufgetreten sind. Diese Schäden resultieren aus dem Zusammenwirken von Fahrzeug und Fahrweg und werden vielfach erst nach längerer Betriebsdauer deutlich, vgl. Abb. 1:

- Im Schotter kommt es zu ungleichförmigen Setzungen bis zur Zerstörung („Pulverisierung“) einzelner Schottersteine. Als Folge von Schotterveränderungen und Setzungen im Untergrund ergeben sich deutliche Verschlechterungen der Gleislage.
- Eine Verfestigung des Planums unter dem Schotter führt zwar zu einer stabileren Gleislage, hat aber deutlich höhere Beanspruchungen zwischen Rad und Schiene und damit eine schnellere Schädigung der Rad- und Schienenlaufflächen zur Folge.
- Auf Rad und Schiene kommt es zu ungleichförmigen Abnutzungserscheinungen und damit zu Schienenriffeln oder zur Polygonalisierung der Radlaufflächen. Die Folge

* Vortrag vor der Plenarversammlung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft

sind Grenzwertüberschreitungen bei Geräuschemissionen und beim Fahrkomfort. Häufig kommt es zu einem unzumutbaren Körperschall (Brummen) im Wagenkasten.

- Neuartige, geregelte Hochleistungsantriebe beanspruchen die Laufflächen von Rädern und Schienen in so hohem Maße, daß der wirtschaftliche Einsatz von Hochleistungslokomotiven gefährdet ist.
- Zusätzlich treten an den Achsen derart angetriebener Radsätze Betriebsfestigkeitsprobleme auf.

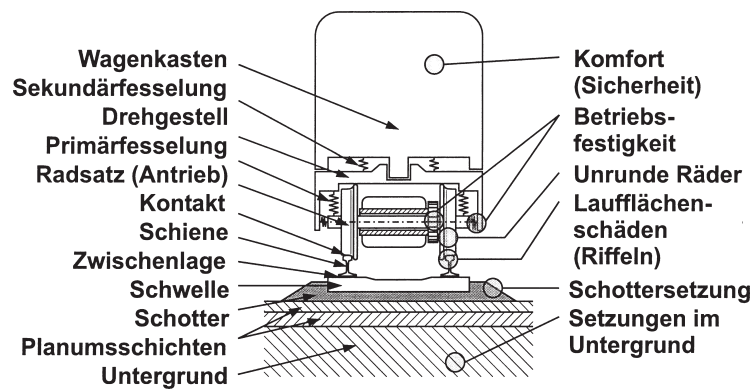


Abb. 1: Komponenten und typische Schäden im System Fahrzeug-Fahrweg

Zur Vermeidung der genannten Schäden sind tiefgreifende Kenntnisse über das dynamische Zusammenwirken der Komponenten im Gesamtsystem notwendig. Dies erfordert eine problemangepaßte Modellbildung und die Durchführung von ganzheitlichen Simulationen. Da der Schädigungsverlauf sehr viel langsamer erfolgt als die ursächlichen systemdynamischen Vorgänge, spielt die Wechselwirkung zwischen Kurzzeitdynamik und Langzeitverhalten eine besondere Rolle.

2. Modellbildung und Systemdynamik

Modellbildung ist nicht Selbstzweck, sondern erfolgt immer im Hinblick auf die zu lösende Aufgabenstellung. Dabei gilt die goldene Regel

- Modelle müssen so einfach wie möglich, aber so genau wie nötig sein.

Das vorliegende komplexe Gesamtsystem, vgl. Abb. 1, besteht aus den beiden Subsystemen Fahrzeug und Fahrweg, die im Kontaktbereich von Rad und Schiene miteinander gekoppelt sind. Bewährte Modelle sind Mehrkörpersysteme für das Fahrzeug und Kontinuumsmodelle für den Fahrweg, vgl. [4], letztere werden häufig diskretisiert unter Ver-

wendung der Methode finiter Elemente, Ziel ist die Beschreibung der Bewegungs- oder Schwingungsvorgänge. Ein wichtiges Merkmal ist dabei der betrachtete Frequenzbereich. Für die vorliegende Fragestellung erweist sich der bisher wenig untersuchte mittelfrequente Bereich von etwa 50 bis 500 Hz als wichtig; während der niederfrequente Bereich unter 50 Hz für den Fahrkomfort, die Fahrstabilität und das Kurvenverhalten und der hochfrequente Bereich über 500 Hz für das Rollgeräusch, die Schallabstrahlung und die Fahrzeugakustik maßgebend sind. Die Erfassung der Phänomene im mittelfrequenten Bereich hat Rückwirkungen auf die Modellbildung. Beispielsweise müssen die elastischen Eigenschaften des Fahrzeugs, insbesondere der Radsätze, erfaßt werden. Dies geschieht in elastischen Mehrkörpersystemen, die mit den kontinuierlichen oder diskretisierten Fahrwegmodellen zu koppeln sind. Die hauptsächlichsten Schädigungen auf den Rad- und Schienenauflflächen sowie im Schotter sind durch Verschleißvorgänge bedingt. In einem bewährten Verschleißmodell wird die Materialabtragsrate proportional zur Reibleistung der Kontaktpartner angenommen. Damit ist die Kopplung der Kurzezeitdynamik mit dem Langzeitverhalten hergestellt. Die viel kompliziertere Rückkopplung verläuft über geometrische Änderungen an einzelnen Komponenten, die sich als Störungen auf die Kurzezeitdynamik auswirken. Das gekoppelte Gesamtsystem ist in Abb. 2 als Blockbild dargestellt.

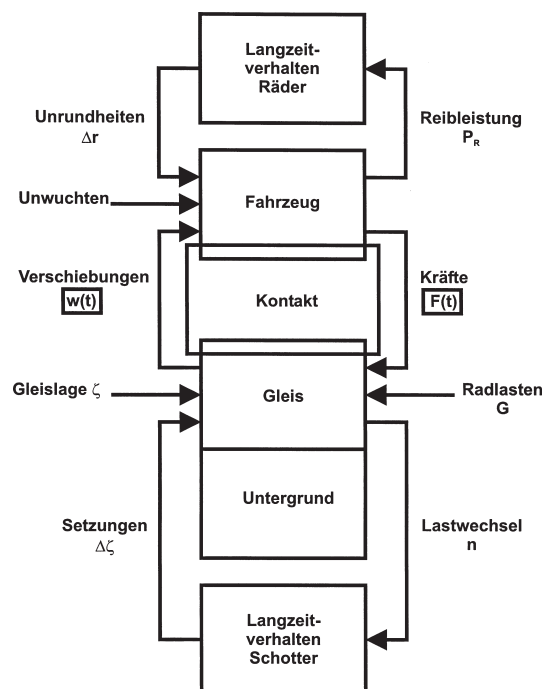


Abb. 2: Aufbau des Gesamtmodells und Wechselwirkungen der Komponenten

3. Lösungsverfahren und Hauptergebnisse

Abhängig von der Struktur der mathematischen Modellbeschreibung erfolgt die Wahl der Lösungsverfahren. Einfache lineare Modelle erlauben die Anwendung effizienter Frequenzbereichsverfahren. Genaue nichtlineare Modelle erfordern hingegen rechenzeitintensive Zeitbereichsverfahren. In Einzelfällen erweisen sich Kombinationen von Zeit- und Frequenzbereichsverfahren als sinnvoll. Eine detaillierte Darstellung der Simulationsergebnisse zur Systemdynamik würde den Umfang dieser Arbeit sprengen, es soll deshalb auf die Literatur verwiesen werden. Eine Zusammenstellung von Ergebnissen finden sich in den Übersichtsarbeiten [5] – [11]. Die für das dynamische Verhalten des Gesamtsystems wichtige Kontaktproblematik wird in [4], [12] und [13] angesprochen.

Einige Hauptergebnisse der bisherigen, noch im Fluß befindlichen Untersuchungen sind:

- Im Bereich der Schottermodelle bestehen nach wie vor Defizite. Neuere Untersuchungen auf der Basis molekulardynamischer Modelle, bei denen die einzelnen Schottersteine einbezogen werden, erscheinen vielversprechend. Diese Modelle müssen jedoch noch experimentell abgesichert und die Parameter an die Realität angepaßt werden. Bereits einfache Dehnstabmodelle für den Schotter zeigen große Änderungen der dynamischen Steifigkeit in Abhängigkeit der Schotterdicke bei Frequenzen zwischen 50 und 250 Hz. Damit läßt sich die Relevanz des mittelfrequenten Bereiches belegen.
- Eine Verfestigung von Schotter und Planum oder neue Fahrwegkonstruktionen wie die sogen. feste Fahrbahn (Betonfahrweg) verbessern zwar die Gleislage, gehen aber mit einer Steifigkeitserhöhung einher. Zur Vermeidung von Laufflächenschäden müssen deshalb nachgiebige Elemente wie Polymer-Zwischenlagen unter den Schienen eingebaut werden. Eine weitere Erhöhung der Nachgiebigkeit dieser Bauteile ist anzustreben.
- Zur Vermeidung von Laufflächenschäden sind auch fahrzeugseitig Maßnahmen zu ergreifen. Eine wirksame Maßnahme besteht in elastischen Bauteilen zwischen Radkranz und Radscheibe (radialelastische Räder). Damit lassen sich die ungefederten Massen verringern und die relativ steife Kopplung von Rad und Schiene mindern.
- An die Stelle der separaten Optimierung einzelner Systemkomponenten muß die optimale Auslegung des Kurz- und Langzeitverhaltens des Gesamtsystems treten. Beispielsweise darf bei der Optimierung der Antriebsregelung die Langzeitbelastbarkeit der Laufflächen nicht unberücksichtigt bleiben.
- In stärkerem Maße als bisher müssen elektronische Überwachungseinrichtungen zur Diagnose sicherheitsrelevanter Komponenten in das Gesamtsystem integriert werden. Bei Straßenfahrzeugen sind diese Einrichtungen deutlich weiter entwickelt als bei Schienenfahrzeugen.

Insgesamt zeigt sich, daß eine Lösung der hier angesprochenen Fragestellung nur durch eine interdisziplinäre Betrachtung der interaktiven Komponenten des Systems Eisenbahn auf der Basis einer integralen Modellbeschreibung möglich ist.

4. Zusammenfassung

Eisenbahnen werden erfolgreich in ganz Europa und vielen außereuropäischen Ländern betrieben. Während der letzten Jahre wurde die Fahrgeschwindigkeit im Intercity-Verkehr ständig vergrößert. Dies führt zu hohen dynamischen Lasten und entsprechenden dynamischen Wechselwirkungen zwischen Fahrwerken, Gleis und Untergrund. Als Folge wurden Langzeitschäden an einzelnen Komponenten wie unrunde Räder, Schienenriffeln und Schottersetzungen beobachtet. Um solche Schäden zu vermeiden ist ein tiefgreifendes Verständnis der Interaktionen zwischen Kurzzeitdynamik und Langzeitverhalten für das Gesamtsystem erforderlich. Dieses Verständnis muß in entsprechende Modelle einfließen, zu deren Analyse problemangepaßte Methoden erforderlich sind. Es zeigt sich, daß viele Phänomene im bisher wenig untersuchten mittelfrequenten Bereich zwischen etwa 50 und 500 Hz auftreten.

Literatur

- [1] PARUTI, F. R.: Chronik der Technik. Chronik-Verlag Düsseldorf 1988, S. 212.
- [2] SALIN, J.: Regards en arrière. Revue Générale des Chemin de Fer **100**, 1981, S. 216-221.
- [3] HUGHES, M.: Die Hochgeschwindigkeitsstory. Alba Düsseldorf 1994, S.11.
- [4] POPP, K.; SCHIEHLEN, W.: Fahrzeugdynamik. Teubner-Verlag Stuttgart 1993.
- [5] POPP, K.; KRUSE, H.; KAISER, I.: Vehicle-track dynamics in the mid-frequency range. Vehicle System Dynamics **31**, 1999, pp. 423-464.
- [6] KRUSE, H.; POPP, K.: Zur Modellierung der Gleisdynamik. Der Eisenbahningenieur **50**, 1999, S. 39-43.
- [7] KNOTHE, K.: Gleisdynamik und Wechselwirkung zwischen Fahrzeug und Fahrweg. Z. Angew. Math. Mech. **79**, 1999, pp. 723-737.
- [8] KNOTHE, K.; GRASSIE, S. L.; ELKINS, J. A. (Eds.): Interaction of railway vehicles with the track and its substructure. Supplement to Vehicle System Dynamics **24**, 1995.
- [9] HOCHBRUCK, H.; KNOTHE, K.; MEINKE, P. (Hrsg.): Systemdynamik der Eisenbahn. Hestra Verlag Darmstadt 1994.
- [10] KNOTHE, K.; GRASSIE, S. L.: Modelling of railway track and vehicle/track interaction at high frequencies. Vehicle System Dynamics **22**, 1993, pp. 209-262.
- [11] TRUE, H.: Some recent developments in non-linear railway vehicle dynamics. Proc. 1st ENOC, Akademie Verlag Berlin 1993.
- [12] KALKER, J. J.: Three-dimensional elastic bodies in rolling contact. Kluwer Dordrecht 1990.
- [13] BÖHM, F.; KNOTHE, K. (Hrsg.): Hochfrequenter Rollkontakt der Fahrzeuigräder. Wiley-VCH Weinheim 1998.

Prof. Dr.-Ing. Karl Popp
Sauerbruchweg 49
D-31535 Neustadt/Nds.